

Title	超高感度光ポンピング原子磁気センサの開発と生体磁気計測(Abstract_要旨)
Author(s)	鎌田, 啓吾
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2015-03-23
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k18994
Right	許諾条件により本文は2016/03/01に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏名	鎌田 啓吾
論文題目	超高感度光ポンピング原子磁気センサの開発と生体磁気計測		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>生体機能や脳機能の解明を目的とした研究では，様々な非侵襲な計測手法が用いられている．その中でも人体から発生する磁気信号を計測する脳磁図(MEG)や心磁図(MCG)などの生体磁気計測は，時間分解能や信号源推定の面で優れており，生体機能計測分野の発展に大きく貢献している．生体磁気信号は地磁気の 10^{-8} 程度と非常に微弱であるため，その計測には高い感度を有した磁気センサを必要とし，これまで，超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた磁気センサが計測に利用されてきた．しかしながら，SQUID は超伝導状態で動作させるため，液体ヘリウムを用いた極低温の冷却が必要不可欠であり，装置の大型化や高い維持コストなど生体磁気計測の普及を妨げるデメリットも存在する．そこで近年，SQUID に代わる新たな磁気センサとして光ポンピング原子磁気センサ(OPAM)が注目を集めている．OPAM はアルカリ金属原子の電子スピン偏極を利用した磁気センサであり，微弱な磁気信号を磁気光学回転に基づいて高感度に捉えることが出来る．OPAM は理論的に SQUID を凌ぐ感度を有し，また，SQUID と異なり極低温の冷却を必要としないことから，生体磁気計測の発展・普及に繋がる磁気センサとして期待されている．</p> <p>本論文では，OPAM による生体磁気計測システムの実現に向けて，K 原子を用いたポンプ・プローブ型の OPAM を開発し，センサ特性の検証や高感度化，生体磁気計測の実証などにより，多角的な検討を行ったものである．本論文は8章からなっており，その構成は以下の通りである．</p> <p>第1章は序論であり，本論文で述べる研究に至る背景，先行研究の概要，研究目的について述べている．</p> <p>第2章では，OPAM の基本となる光ポンピング，磁場計測原理，OPAM のセンサ特性に影響するスピン緩和，高感度化の実現に必要な Spin-Exchange Relaxation-Free (SERF) 条件について述べている．</p> <p>第3章では，OPAM の出力信号及び，主に計測帯域を中心としたセンサ特性の動作条件依存性に関して検討を行った．計測環境下で調整可能なパラメータに対する磁場応答信号強度や計測帯域の変化を計測し，計測原理に基づく理論値と比較することでその妥当性を検証すると共に，計測帯域の可変性について検討した．計測結果及び理論値は良く一致しており，開発した OPAM が理論に即した挙動を示していることを確認した．また，セル内でのスピン偏極やレーザ光強度の空間分布を考慮した数値計算により，センサ特性の複雑な挙動を表せることを示した．動作条件の内，プローブ光波長や強度の変化は計測帯域への影響が小さいことから，磁場応答信号強度が最大となるプローブ光の設定が望ましいことが示唆された．その一方で，OPAM の計測帯域はポンプ光と平行に印加するバイアス磁場により中心周波数を決定し，ポンプ光強度により帯域幅を調整することで任意の範囲に設定できるという結論に至った．</p> <p>第4章では，心磁図(MCG)の計測における OPAM の周波数特性の影響について検討した．第3章での計測帯域の可変性を受け，異なる計測帯域に設定した場合に疑似心</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	鎌田 啓吾
<p>磁波形を計測することで、計測波形の形状の変化について検討すると共にセンサの周波数特性を補正するキャリブレーションの有効性について検証した。その中で、ヒト MCG 計測に適した帯域の設定条件について検討した。20 Hz 以下の周波数領域に主な信号成分が集中しているヒト MCG の計測では、共鳴周波数を 10 Hz 付近に設定し、磁場応答信号強度が強く、最小検出限界が小さくなることを優先した動作条件の設定が望ましいという結論に至った。上記の結論を踏まえた上で生体磁気計測用に構成した OPAM システムにおいてヒト MCG 計測可能な最小検出限界を達成した。実際にヒトを対象に多点で計測した MCG では、R ピークや T 波といった典型的な特徴を確認すると共に、生理学的な知見とも矛盾しない磁場分布を得ることができ、開発した OPAM による MCG 計測の実現可能性を示した。</p> <p>第 5 章では、生体磁気計測用のモジュール型 OPAM を用いて、脳磁図(MEG)計測を実施した。まず、モジュール型 OPAM がヒト MEG を計測可能な感度を有していることを示した。また、ヒトの頭部を模して作製した生体ファントムから発生する磁場の計測により、モジュール型 OPAM が構造的にもヒト MEG を計測可能な性能を有していることを示した。以上の結果を踏まえて実施したヒト MEG 計測では、開閉眼の切り替えに伴う α 波帯(8-13 Hz)における事象関連脱同期や聴覚刺激に対する事象関連脳磁界を観測した。加えて、既存の全頭型 SQUID-MEG システムで計測した結果と比較することで、センサ構造の違いからくる計測結果の差異も含めた妥当性を検証した。モジュール型 OPAM は、MEG 計測において既存の SQUID-MEG システムに劣らない性能を有していること示した。</p> <p>第 6 章では、前章までのセンサシステム開発を通じて行ってきた、高感度化に向けたノイズ低減方法についてまとめた。センサシステムの構成要素のノイズ源を追究することにより、OPAM のシステムノイズの低減に成功し、生体磁気計測が可能な感度の実現に至った。その後、システムノイズ低減により顕在化した環境磁場ノイズの影響を取り除くべく、グラジオメータを構成した。グラジオメータ構成に伴うセンサシステムの改良により、システムノイズは更に低減し、約 $3 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ の最小検出限界を達成した。グラジオメータ構成においては、$20 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ 以上の環境磁場ノイズを $10 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ 程度まで低減できることを示した。その後、構造的に従来のグラジオメータより利点の多い光学的グラジオメータを新たに構成し、従来のグラジオメータに匹敵するノイズ低減、SNR 向上効果を示し、感度面でも優れた性能を示す結果を示した。</p> <p>第 7 章は考察であり、第 3 ～ 6 章で述べた研究成果に関する総括的な検討および今後の発展について述べている。</p> <p>第 8 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

脳磁図(MEG)や心磁図(MCG)といった磁気信号を計測する生体磁気計測は、生体機能の解明はもとより、診断支援など医療にも貢献する重要な技術である。近年、微弱な生体磁気信号を計測する超高感度な磁気センサとして、既存のセンサよりも感度や構造の面で利点の多い、光ポンピング原子磁気センサ(OPAM)が注目を集めている。本論文では、この OPAM を用いた生体磁気計測システムの実現に向けて、K 原子を用いたポンプ・プローブ型の OPAM を開発し、センサ特性の検討、高感度化に関する検討及び生体磁気計測の実施により、以下の4つの知見を得ている。

1. OPAM の計測帯域などセンサ特性の動作条件依存性に関し、様々な周波数成分を有する生体磁気信号を計測する際に求められる計測帯域の調整可能性について検討した。その結果、OPAM の計測帯域はポンプ光と平行に印加するバイアス磁場で中心周波数を決定した後、ポンプ光強度により帯域幅を調整することで任意の範囲に設定できることを示した。
2. 異なる計測帯域下で疑似 MCG を計測することで、計測波形のキャリブレーションについて検討し、MCG 計測に適した OPAM の動作条件を決定した。その後、システムノイズの低減により MCG を計測可能な最小検出限界を達成し、MCG 計測を実施した。計測結果から生理学的な知見と矛盾しない磁場分布を得た。
3. モジュール型 OPAM を用いて頭部を模した生体ファントムから生じる磁場を計測し、モジュール型 OPAM の性能を示した。その後、ヒト MEG 計測を実施し、開閉眼に伴う 8-13 Hz 帯の自発律動の計測、さらに聴覚刺激に対する事象関連脳磁界応答の計測に成功した。
4. OPAM の高感度化に向けてシステムノイズの低減及び、それにより顕在化した磁場ノイズの低減方法について検討した。磁場ノイズ低減のため OPAM におけるグラジオメータを構成し、システムの改良によりその有効性を示した。また、その応用である光学的グラジオメータを提案・構成し、磁場ノイズ低減、SNR 向上効果を示した。

以上のように、本論文では MCG、MEG 計測を通して OPAM による生体磁気計測の実現可能性を示すと共に、計測帯域の可変性やノイズ低減方法など、OPAM の開発において有用な新知見を得ており、今後、多チャンネル化など実用化に向けた研究・開発に役立つ工学的に大変価値あるものと判断でき、学術上、實際上寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年2月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。